

PROGETTO DI SOLLEVAMENTO DEL CAMPANILE DI PISA ONDE RENDERE POSSIBILE LA COSTRUZIONE SOTTO DI ESSO DI UNA FONDAZIONE EFFICIENTE

Premesse e descrizione generale del sistema

G. COLONNETTI (*)

SOMMARIO: L'A. prospetta i termini attuali del problema del Campanile di Pisa e la necessità di provvedere a dotarlo di una fondazione efficiente. Avverte che tutte le proposte fino ad ora formulate a questo fine sono state riconosciute inattuabili, perché rischiano di compromettere l'attuale precario equilibrio della costruzione. Espone le caratteristiche di una sua proposta tendente a mettere al sicuro la torre mediante una operazione di sollevamento, e rendere così possibile la costruzione della sottofondazione. La proposta è attualmente sottoposta all'esame ed alle decisioni del Ministero dei LL.PP.

Il Campanile della Primaziale di Pisa, noto in tutto il mondo per la squisita eleganza della sua architettura, ma anche, e forse più, per l'arditezza del suo strapiombo, ha ancora una volta richiamato l'attenzione di quanti si preoccupano della sua stabilità, accusando, negli ultimi due anni un sensibile aggravamento del lento ma continuo accrescersi della sua pendenza.

Perché ciò avvenga è ben noto: i valenti architetti che tra il 1174 ed il 1283 progettaron e costruirono il Campanile non si curarono di dargli una adeguata fondazione; si limitarono a poggiare l'enorme massa — che pesa ben 15.000 tonnellate — su di un terreno sicuramente incapace di sopportarla. La costruzione non era ancor giunta a metà della sua altezza che già il terreno incominciava a cedere sotto il suo peso. Donde una breve sospensione dei lavori; poi questi vennero ripresi e la torre elevata fino a 56 metri di altezza. Da settecento anni la sua pendenza va lentamente ma continuamente crescendo; lo strapiombo ha ormai raggiunto i m 4,50.

Da cinquant'anni i movimenti del Campanile sono seguiti e misurati con grande precisione (v. Fig. 1).

Paolo Pizzetti che era, prima della prima guerra mondiale, professore di geodesia all'Università di Pisa, organizzò una triangolazione geodetica che serve tuttora alla determinazione degli spostamenti di un certo determinato punto della settima cornice per rapporto a dati capisaldi. Noi sappiamo così che, durante questi cinquant'anni, lo spostamento medio

non ha superato gli otto decimi di millimetro all'anno; con variazioni però non trascurabili da un anno all'altro: vi fu per esempio un anno, il 1935, in cui, essendo stati eseguiti certi lavori intesi ad impermeabilizzare la platea e le pareti del catino che circonda il basamento della torre, si verificò uno spostamento di oltre 5 mm che dimostrò fino a qual punto fosse sensibile la torre ad ogni sia pur cauto intervento sulle sue fondazioni o sul terreno che le sopporta.

Il ritmo degli spostamenti ridivenne normale fin dall'anno seguente e tale si mantenne fino a questi ultimi tempi. Nel 1962 lo spostamento raggiunse però i 2 mm ed otto decimi, e nell'anno in corso si sono già riscontrati quasi 2 mm.

Donde l'allarme.

Vien fatto di chiedersi: il pericolo è reale ed imminente?

La risposta non può esser dubbia: allo stato delle cose la risultante dei carichi è ancora interna al nocciolo centrale della base d'appoggio — e conseguentemente l'asse neutro è esterno ed ancora lontano (forse una decina di metri) dal contorno di detta base —. Se pertanto i cedimenti continuassero a verificarsi col ritmo che ha caratterizzato questo ultimo cinquantennio, o anche con quello accusato negli ultimi due anni, il Campanile di Pisa avrebbe ancora davanti a sé molti anni di vita. Ma è un'ipotesi su cui non si può fare nessun serio assegnamento: man mano che ci si andrà avvicinando alla fase critica, e ben prima di averla effettivamente raggiunta, è possibile che si verifichino fatti nuovi,

(*) Prof. Ing. Gustavo COLONNETTI, Presidente Emerito del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

che cioè l'equilibrio del terreno si rompa e la situazione precipiti verso la catastrofe.

Bisogna dunque provvedere, e provvedere senza indugio, tanto più che, mano a mano che la pendenza cresce ed il terreno viene sovraccaricato sotto pen-

al *Ministero* competente hanno, specie in questi ultimi anni, fatto pervenire le loro proposte intese tutte a dotare la torre di quella fondazione efficiente che disgraziatamente non le hanno data i suoi costruttori.

Ma tanto i progettisti quanto le autorità che di

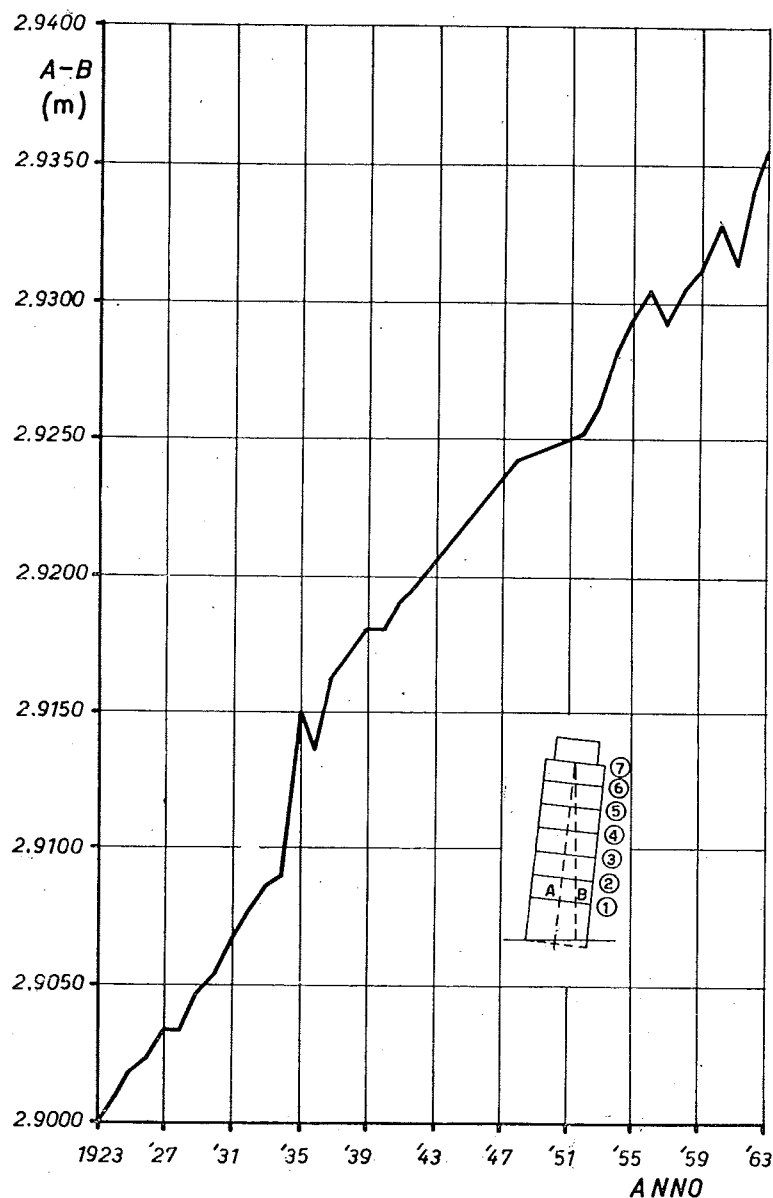


Fig. 1 - Strapiombo A-B del centro della 7^a cornice rispetto al centro della 1^a cornice.

denza, le operazioni da compiersi diventano necessariamente più delicate e più pericolose.

Ed ecco allora la seconda domanda: che cosa si può fare?

A questa domanda hanno cercato di rispondere le numerose commissioni di valorosissimi tecnici che l'*Opera della Primaziale* ed il *Ministero dei Lavori Pubblici* hanno incaricato dello studio dell'arduo problema.

Alla stessa domanda hanno anche cercato di rispondere numerosi progettisti italiani e stranieri che

quei progetti sono state investite, si sono resi conto del pericolo che incombe su qualsiasi lavoro di sottofondazione della torre; perché è fuor di dubbio che basterebbe dare inizio ad un lavoro del genere per determinare un turbamento nell'attuale precario stato di equilibrio del terreno, con conseguenze che è assolutamente impossibile prevedere e che nessuno può seriamente illudersi di contrastare mediante incastellature o puntellature che la torre non mancherebbe di travolgere nella sua caduta se le dovesse venir a mancare l'attuale sostentamento alla base.

Personalmente non vedo che una sola soluzione

possibile, che, in collaborazione coll'Ing. Riccardo MORANDI, ho in questi giorni messa a punto e sottoposta all'esame ed al giudizio delle Autorità responsabili: sollevare la torre, sollevarla di quel poco (o di quel tanto) che sarà necessario perché essa non gravi più col suo peso sul sottostante terreno; costruire in esso senza più alcuna preoccupazione statica la fondazione voluta, e riposare poi la torre, con movimento inverso a quello impiegato per sollevarla, sulla nuova fondazione che la potrà sopportare indefinitamente e con assoluta sicurezza.

Ecco ora in breve come potrebbe venir concepita e condotta l'arditissima impresa (v. Fig. 2).

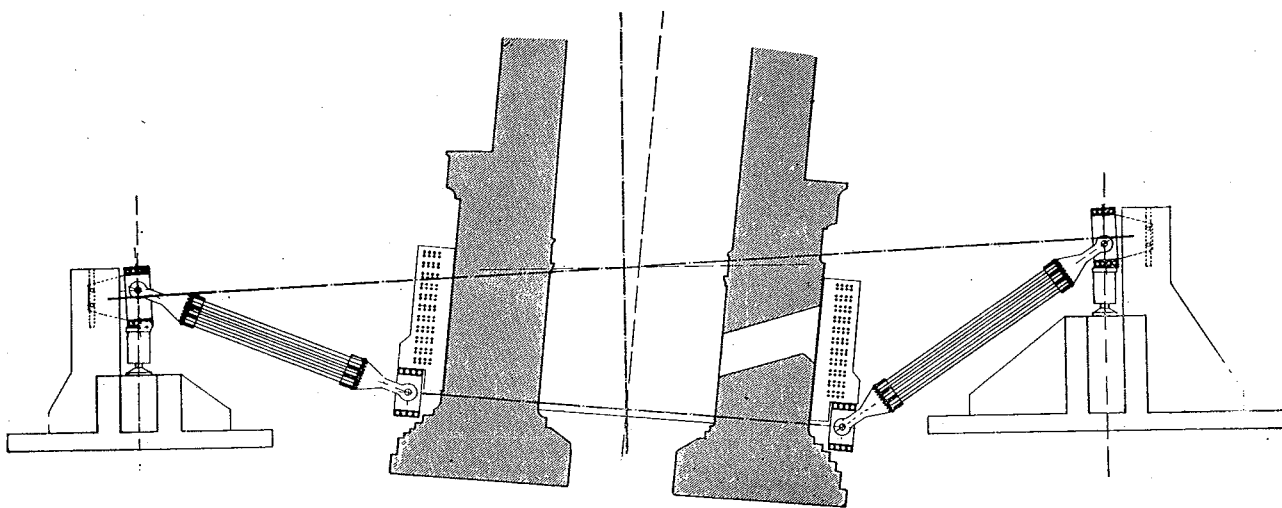


Fig. 2 - Schema del dispositivo proposto per il sollevamento del campanile.

Il tamburo inferiore della torre dovrà per l'occasione venir circondato da una robusta fasciatura in cemento armato precompresso, avente il compito di stringerlo quanto occorre per renderlo ad essa perfettamente solidale.

La fasciatura riposerà su di un anello di acciaio che circonda la base della torre, e che è a sua volta portato da quindici sistemi di cavi facenti capo a quindici coppie di martinetti simmetricamente ed uniformemente distanziate sul terreno circostante, e poggianti su solide fondazioni del tutto indipendenti dalla fondazione della torre.

Un adeguato dispositivo di ancoraggi farà sì che le azioni verticali esercitate dai martinetti si trasmetteranno integralmente all'anello portante, e quindi alla torre, ed imprimeranno loro un lentissimo moto di traslazione verticale.

Mano mano che questo si verificherà il peso della torre verrà a trasferirsi sui martinetti; e quando la somma delle azioni da essi sviluppate eguaglierà il peso della torre noi saremo sicuri che questo non graverà più sul sottostante terreno.

Allora, e allora soltanto, si potrà procedere ai lavori di sottofondazione, qualunque essi siano per essere, e ciò senza più alcun pericolo per la incolumità dello storico monumento.

A lavori ultimati i martinetti, eseguendo a ri-

troso la loro manovra, deporranno la torre sulla nuova fondazione atta a sostenerne indefinitamente il peso, e le famose campane, che da tanti anni prudenza vuole che tacciano, potranno di nuovo diffondere la loro voce nel cielo di Pisa.

Perché una tale duplice delicatissima operazione possa compiersi in condizioni di assoluta sicurezza, due condizioni debbono realizzarsi: l'una riguardante la sincronizzazione nella manovra dei martinetti, l'altra relativa al controllo dei movimenti da essi determinati.

Entrambe sono rese possibili dagli studi eseguiti in questi ultimi due anni in vista del progettato

salvataggio dei templi di Abu-Simbel minacciati dalle acque del Nilo che si sollevano man mano che si eleva la diga di Assuan.

Rispondendo all'appello lanciato dall'UNESCO al mondo intero, noi italiani avevamo redatto un ardito progetto di sollevamento di un'intera montagna, a mezzo di un nuovissimo tipo di martinetti idraulici a regolazione meccanica della corsa, studiati e messi a punto dalla *Grandi Motori* della F.I.A.T.

Che il nostro progetto ⁽¹⁾ — che era stato unanimemente giudicato « primo » da una Commissione internazionale di esperti — sia poi stato abbandonato dall'UNESCO che, non essendo riuscita a trovare il necessario finanziamento, sembra disposta a ricorrere a pietose soluzioni di ripiego, ha una importanza assai relativa.

Quel che veramente conta si è che un importante progresso è stato intanto realizzato nella tecnica dei martinetti idraulici, e che questo progresso può venire utilizzato per rendere possibile, attraverso la manovra che ho sopra descritta, la salvezza di un

(1) G. COLONNETTI: *Il progetto italiano per il salvataggio dei templi di Abu-Simbel*. Accad. Naz. dei Lincei - anno CCCLVIII (1961) - quad. n. 49.

Les temples d'Abou-Simbel en danger. Pontificia Academia Scientiarum - Commentarii, vol. I, n. 7 (4 oct. 1962).

monumento come la torre di Pisa che, a noi italiani, e non a noi soltanto, interessa quanto, e forse più, delle colossali statue di Ramsete II e della regina Nefertari.

Due parole dovrebbero bastare a chiarire il concetto informatore in base al quale, in questo nuovissimo tipo di martinetti, si possono realizzare spostamenti ben definiti, qualunque sia la resistenza che essi incontrano.

A tal fine, nella parete di un cilindro — nell'interno del quale un pistone può muoversi sotto l'azione di un fluido in pressione — è disposta una apparecchiatura destinata a proporzionare automaticamente la pressione del fluido motore all'entità del carico applicato al pistone, onde render possibile che gli spostamenti di questo vengano determinati indipendentemente dalla entità e dalle eventuali variazioni del carico stesso.

Tale apparecchiatura è documentata nella Fig. 3

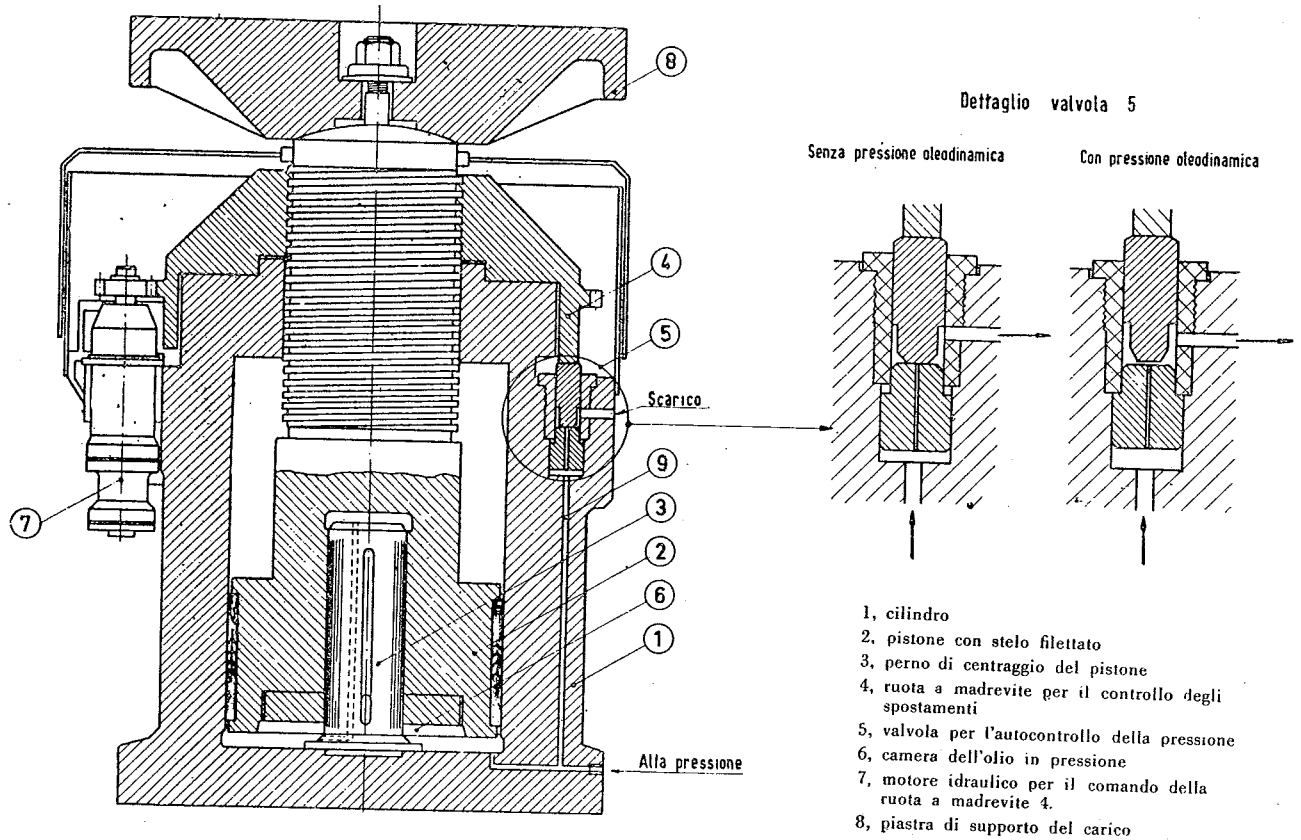


Fig. 3 - Martinetto idraulico con controllo meccanico della corsa (brev. FIAT).

FUNZIONAMENTO DEL MARTINETTO

In posizione di riposo o di sostentamento statico, essendo nulla la pressione dell'olio, il condotto 9 risulta chiuso dalla valvola 5 su cui preme la madrevite 4 sotto l'azione del carico eventualmente applicato alla piastra 8 ed al pistone 2.

Tale carico viene pertanto trasmesso per via esclusivamente meccanica dal filetto della vite alla madrevite e da questa direttamente al cilindro.

All'inizio del funzionamento il condotto 9 resta chiuso fino a che nella camera 6 del cilindro la pressione non abbia raggiunto un valore leggermente superiore a quello che corrisponde al carico da sollevare.

In fase di sollevamento del carico, insieme col pistone 2 si solleva anche la madrevite 4 avvitata sul suo stelo, ed attraverso la valvola 5 si viene ad aprire una via di scarico all'olio, la cui pressione nella camera 6 cessa di crescere e si stabilizza nella misura richiesta dal carico.

Si determina così una specie di galleggiamento del pistone, grazie al quale la trasmissione del carico avviene attraverso l'olio in pressione, e la madrevite, completamente scaricata, può venire liberamente manovrata a mezzo del motorino idraulico 7.

Ora ogni rotazione della madrevite, in un senso o nell'altro, determina uno strozzamento o un ampliamento della luce di scarico controllata dalla valvola 5, e dunque un incremento od una diminuzione della pressione dell'olio nella camera 6, con conseguente immediato incremento o diminuzione della spinta che l'olio esercita sul pistone.

Ne segue che ad ogni movimento di rotazione impresso alla madrevite dovrà corrispondere un movimento di traslazione del pistone (e quindi del carico che esso sopporta) movimento che avrà termine non appena, riportata alla primitiva misura la luce di scarico nella valvola 5, si sarà ristabilito l'equilibrio tra il carico e la pressione dell'olio.

e nella annessa descrizione delle modalità del suo funzionamento.

In alcuni miei precedenti scritti (2) si trova la giustificazione di questo modo di procedere, nonché la documentazione di alcune prove eseguite nell'*Istituto Dinamometrico Italiano*.

Queste prove hanno fornito una espressiva misura della prontezza e della precisione con cui questo tipo di martinetto realizza gli spostamenti del carico che gli vengono richiesti colla semplice manovra della madre vite, e ciò qualunque sia il carico che il martinetto sopporta e comunque questo carico vari, senza che da parte dell'operatore si avverta una sensibile variazione della potenza (in ogni caso piccolissima) occorrente per la manovra della madre vite.

Condizione questa essenziale che rende possibile la perfetta sincronizzazione di un numero qualunque di martinetti.

Quanto alle apparecchiature di controllo, esse sono state studiate e messe a punto nei Laboratori del *Istituto Dinamometrico Italiano del Consiglio Nazionale delle Ricerche*.

Esse presuppongono un orizzonte artificiale costituito dalla superficie libera di un liquido pesante, sulla quale verranno sistemati quindici galleggianti ciascuno dei quali comanda un trasduttore differenziale

(2) G. COLONNETTI: *Un nouvel appareillage pour la création d'états de coaction*. — Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. 255, 27 août 1962.

Ricerche sperimentali su di un modello di martinetto idraulico con controllo meccanico della corsa. — Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino, vol. 96, 14 novembre 1962.

Le problème de la synchronisation des vérins dans le relevage de masses imposantes. — Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. 256, 14 Janvier 1963.

A PROJECT FOR LIFTING THE BELL-TOWER OF PISA, THUS PERMITTING CONSTRUCTION OF A SATISFACTORY FOUNDATION UNDERNEATH

Summary: The A. presents the terms — such as are at present — of the problem concerning the bell-tower of Pisa, and points out the necessity of supplying it with a satisfactory foundation. He indicates that all propositions so far developed to this purpose have proved unrealizable, as they may seriously endanger the present precarious equilibrium of the building. Description is given of the characteristics of his project, which contemplates lifting of the tower, thus making it possible to build a basement underneath. This project has been submitted to the Ministry of the Public Works, that will examine it and decide on the matter.

ad induttanza variabile, capace di segnalare le variazioni di posizione del punto del solito anello portante della torre a cui il trasduttore è collegato, con una precisione che è dell'ordine dei centesimi di millimetro.

Va da sé che il segnale d'uscita di ciascun trasduttore oltre che per la doverosa segnalazione al quadro di comando, potrebbe venire utilizzato per il comando diretto del corrispondente martinetto. La manovra potrebbe in questo modo divenire completamente automatica.

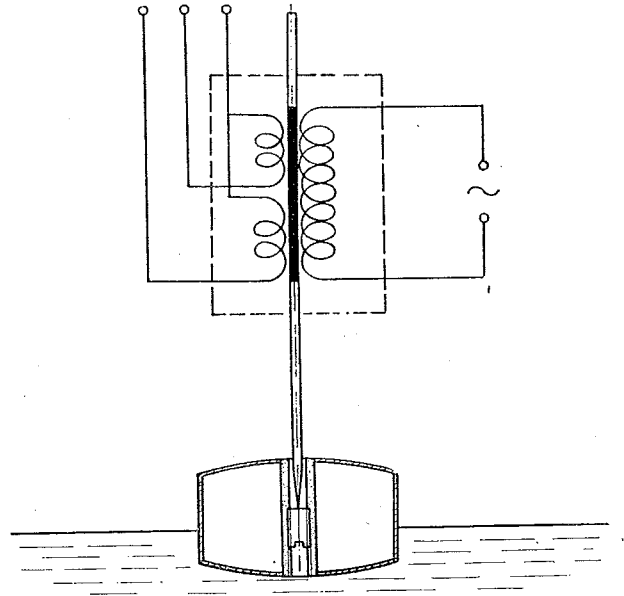


Fig. 4 - Schema dei galleggianti a trasduttori differenziali per il controllo ed il comando automatico dei martinetti.

LE PROJET DE SOULÈVEMENT DE LA TOUR DE PISE; A FIN DE RENDRE POSSIBLE LA CONSTRUCTION D'UNE SOUS-FONDATION EFFICACE

Sommaire: L'A. présente les termes actuels du problème de la tour de Pise et la nécessité de pourvoir à une fondation efficace. Il rappelle que toutes les propositions jusqu'ici parvenues se sont révélées irréalisables, car elles risquaient de compromettre l'équilibre déjà précaire de la construction. Il décrit les caractéristiques de son projet tendant à mettre en sûreté la tour au moyen d'une opération de soulèvement, afin de rendre possible la construction des fondations. On attend actuellement la décision du Ministère des Travaux Publics, auquel le projet a été soumis.